

УДК 621.57

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.167101

## Термодинамічний аналіз схемно-циклового рішення машини тепло-холодопостачання індивідуального будинку

Л. І. Морозюк, В. В. Соколовська-Єфименко, В. В. Кандєєва,  
А. В. Мошкатюк, А. К. Куколєв

*Напрямом дослідження є термодинамічний аналіз схемно-циклового рішення машини для тепло-холодопостачання індивідуального будинку з приводом від автономної сонячної фотоелектричної установки, здатної задовольнити приватних споживачів цілорічним отриманням тепла та холоду в умовах сухого тропічного клімату.*

*Для аналізу використано одноступеневу компресорну холодильну машину, яка працює в двох режимах: холодильному для кондиціювання повітря та теплонасосному для опалення, обслуговуючи усі приміщення будинку. Зміна режимів здійснюється сезонно або на протязі доби в залежності від температури навколишнього середовища. Визначались енергетична ефективність циклу холодної машини (задача енергетична), пов'язана з властивостями робочої речовини, та габарит циклу (задача транспортна) – пов'язана з схемно-цикловим рішенням, масою устаткування та інвестиційними витратами. В дослідженні використані робочих речовин R404a, R134a, R410, R290, R600a, R32, які не заборонені або термін їх використання ще не вийшов. Розрахунки виконувалися окремо для кожного режиму. Одержані результати визначили, що робочі речовини R290, R600a, мають високу ефективність в обох режимах, R404A, R410, R32 мають однакову енергетичну ефективність, відрізняючись не більше ніж на 10 %, R134a в режимі опалення не конкурентоздатний. З габаритів циклів перевагу мають R32, R410 з значеннями вдвічі меншими за габарити R290, R404A, R600a та R134a до альтернативної групи не входять. Виходячи з термодинамічного аналізу та моніторингу ринку робочих речовин, тільки R32 може бути рекомендованим для реальних проектів. Окремо здійснено термодинамічний аналіз схемно-циклових рішень для CO<sub>2</sub> – реальної перспективи холодної техніки*

*Ключові слова: холодильна машина, робоча речовина термодинамічний аналіз, енергетична ефективність, габарит циклу*

### 1. Вступ

Виробництво штучного холоду або тепла є складовою технологічних процесів багатьох технічних систем. Проект технічної системи, яка включає холодильну машину та (або) тепловий насос в технологічний процес системи, повинен містити енергетичний та екологічний аналіз вказаних машин.

Світова статистика, спираючись на кліматичні умови та рівень економічного розвитку різних країн світу, стверджує, що майже 20 відсотків споживання електроенергії йде на охолодження (виробництво холоду) та опалення (вироб-

ництво тепла) [1]. У зв'язку з цим у всьому світі вказані машини знаходяться під тиском жорстких вимог до економної витрати паливно-енергетичних ресурсів та екологічної чистоти усіх видів виробництв.

За останні роки набуває значимості соціальний ефект, який пов'язано з впливом клімату на існування та життєдіяльність людей. З цих позицій штучний холод розширює свій вплив. Одним з перспективних шляхів вирішення енергетичних, екологічних та соціальних проблем людства є створення установок сумісного виробництва трьох корисних ефектів – електроенергії, тепла та холоду. Для холодильних машин та теплових насосів існує перспектива для удосконалення на засадах використання тепла широкого температурного потенціалу паливних енергетичних установок або відновлюваних джерел енергії і створення нових схемно-циклових рішень. Серед вказаних найбільшим попитом користуються систем тригенерації малої енергетики з різними типами автономних енергетичних установок [2]. Такі системах необхідні майже для 70 відсотків територій багатьох країн світу, які не охоплені центральними електричними мережами та мають складні кліматичні умови. Тому в існуючих сучасних умовах перехід на енерго-ресурсозберігаючі технології з підвищенням соціального рівня життя людини стає особливо актуальною науково-практичною задачею.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Рішення про доцільність застосування системи тригенерації для конкретного споживача з вибором робочих параметрів, характеристик та устаткування вимагає детального аналізу і збору даних щодо кожного елемента системи. Дані для аналізу надходять з вивчення енергетичного, економічного, екологічного стану споживача, моніторингу роботи дійсних установок в подібних умовах і розвитку сучасного виробництва в галузі відповідного устаткування. Загальний підхід до аналізу технічної системи розглядається в роботі на окремому прикладі – проектування системи для тропічного та різко континентального клімату. Стан такого навколишнього середовища характеризується високими середніми місячними температурами влітку ( $26...40^{\circ}\text{C}$ ) і порівняно низькими взимку ( $-10...10^{\circ}\text{C}$ ), тобто коливання середніх температур на протязі року  $15...30$  градусів. В той же час добові коливання температури у всі сезони можуть досягати 40 градусів. В роботі [3] надано аналіз кліматичних та погодних умов декількох країн Близького Сходу. Отримано інформацію про постійну високу сонячну радіацію на протязі усього року, постійні добові коливання температури зовнішнього повітря, які накладаються на сезонні. Усі природні явища у сукупності негативно впливають на здоров'я та життєдіяльність людей. На підставі цього доведено необхідність в цілорічному змінному не тільки сезонному, але і добовому кондиціонуванні та опаленні житлових приміщень з використанням сонячних енергетичних установок.

Для реалізації режимів охолодження та підігрівання в одній машині в різні сезони року світовий ринок пропонує малі агрегатовані «Спліт-системи» [4] та середні і великі дахові машини «Руфтопи» [5]. Зміна температурних режимів кондиціонування та опалення в житловому приміщенні для обох машинах

пов'язано з реверсом руху робочої речовини через теплообмінні апарати, завдяки додатковому регулюючому обладнанню. Такий спосіб задовольняє сезонну роботу машини на протязі року і не може бути використаним для короткочасних змін режимів на протязі доби. Причини – швидка зміна термодинамічних процесів, робочих тисків та температур в апаратах, інерційність машини. Крім того, для забезпечення комфортної атмосфери в будинку, спліт-системи встановлюють у кожному приміщенні. Працюють вони циклічно, регулювання здійснюється пуском та зупинкою компресора. Великі пускові токи декількох компресорів негативно впливають на енергетичне обладнання фотоелектричної станції. З урахуванням викладеного в роботі [6] здійснено синтез схемно-циклового рішення холодильної машини з реалізацією змінних режимів залежно від добових та сезонних коливань температури навколишнього середовища. Температурний зв'язок між машиною та приміщенням здійснює повітря з активної вентиляції.

Інтенсивна сонячна радіація на протязі року за таких кліматичних умов уможливорює використання сонячної енергетики [7] як великої потужності, так і малої, тобто локальних енергопостачальників. Вироблене сонячними приладами тепло в приватному «сонячному» будинку використовують лише за прямим призначенням – гарячим водопостачанням або опаленням [8]. Кондиціювання повітря тепловикористальними холодильними машинами за вказаних умов технічно складно, а економічно недоцільно.

Власники «сонячних» будинків, оснащених автономними фотоелектричними станціями прямого перетворення сонячної енергії в електричну [9], мають можливість використовувати компресорні холодильні машини для кондиціювання та опалення, високотехнологічні побутові електронні пристрої та ін. Такий приватний будинок стає елементом системи, в якому одночасно використовують три корисні енергетичні ефекти – електрику, тепло та холод. Тим самим забезпечено енергозбереження, екологічна чистота та високий соціальний стан родини, що мешкає в цьому будинку.

Ефективність системи тригенерації визначає машина, яка забезпечує виробництво холоду та тепла. Результати енергетичного аналізу системи тригенерації тропічного типу, оприлюднені в роботі [10], показали, що 57 % виробленої енергії йде на виробництво холоду. Енергетична досконалість холодильної машини пов'язана з властивостями робочої речовини, а інвестиційна – з схемно-цикловим рішенням та устаткуванням.

В останні 35 років робочі речовини холодильних машин та теплових насосів знаходяться під вогнем критики – як за їх вплив на захисний озоновий шар Землі, так і за їх потенціал глобального потепління. Довгий час R-22 був найбільш поширеним холодоагентом. Але в даний час його використання припиняється відповідно до Міжнародного договору щодо захисту озонового шару Землі [11].

З 2020 р. в розвинених країнах світу припиняється виробництво робочих речовин R21, R124, R142b, R22, R123 і R141b. Вибір робочої речовини тепер стає компромісом між еколого-енергетичними показниками робочої речовини, безпекою та ціною [12].

З 1 січня 2017 року у Європейському Союзі вступив в дію офіційний документ, який забороняє заправку R134a в нові автомобільні кондиціонери. Запропоновано новий R1234yf, який відповідає всім критеріям сучасних екологічних стандартів. Представники компанії Mercedes-Benz виступили із заявою, що R1234yf відрізняється від свого попередника лише температурною характеристикою займання і не більше. У перспективі компанія планує використовувати CO<sub>2</sub> у якості холодоагенту [13]. Основним недоліком використання CO<sub>2</sub>, на думку фахівців, є дорожня конструкція системи кондиціонування. Пояснюється це тим, що в новій системі газ циркулює під високим тиском (до 10,0 МПа), що передбачає посилення всієї магістралі охолодження.

У минулому році Апеляційний суд США по округу Колумбія заборонив, згідно з правилами EPA [14], робочі речовини R134a, R404A, R407C і R410A, для використання в новому обладнанні холодильної техніки [15].

Пропан (R290) в якості робочої речовини холодильних машин використовувався вже досить давно. Основна сфера застосування – промислове холодильне обладнання в діапазоні теплових потужностей від 50 до 200 кВт. У зв'язку з відмовою від багатьох популярних речовин та посилення норм обсягу холодоагенту в системі, R290 все частіше став застосовуватися в побутових холодильних пристроях.

В теплових насосах типу «повітря/вода» та безпосереднього кипіння R290 використовують порівняно нещодавно, завдяки хорошим термодинамічним властивостям. При конструюванні машин з R290 не виникає проблем з вибором конструкційних матеріалів деталей компресора, конденсатора і випарника, Пропан добре розчиняється в мінеральних оливах, тому під час заміни R22 холодильна машина залишається без змін. При цьому продуктивність падає не більше ніж на 15 % [16].

Результати дослідження щодо використання компресорних холодильних машин з приводом безпосередньо від фотоелектричної установки присутні у різних роботах, але інформація щодо робочих речовин холодильних машин дуже мізерна.

В роботі [17] проведено оцінювання техніко-економічного потенціалу переведення звичайного побутового холодильника з R134a робочою речовиною з змінного на постійний струм з приводом без інвертора. Результати роботи свідчать, що застосування холодильних машин з компресорами постійного струму мають потенціал зниження загальної вартості фотоелектричної установки, приблизно на 18 %. Зміна робочої речовини не розглядалась.

В роботі [18] виконано термодинамічний та економічний аналіз використання сонячних абсорбційних чилерів та компресорних з приводом від фотоелектричної станції холодною потужністю 10 кВт для комерційних споживачів. Аналіз висвітлив високу термодинамічну ефективність компресорної машини в поєднанні з фотоелектричною установкою. На жаль автори не навели даних з робочої речовини холодної машини, зосередившись на традиційних робочих речовинах абсорбційної машини.

В роботі [19] розглянуто кондиціонер з компресорною холодною машиною з приводом від автономної сонячної фотоелектричної установки. В схе-

му кондиціонера включено акумулятор водяного льоду, насос та фанкойл. Схема сонячної установки мала дві робочі моделі: одна з контролером та інвертором, друга – з додатковою акумуляторною батареєю. У якості робочої речовини в холодильній машині використано R134a, і автори звертають увагу на його позитивні якості. Результати дослідження показали енергетичні переваги акумуляції льоду в системі кондиціонера, і такі висновки авторів задовольнили.

Розглянута наукова інформація необхідна для розвитку малої енергетики на засадах енергозбереження та екологічної безпеки. Розвиток пов'язано з створенням систем тригенерації з автономними сонячними фотоелектричними установками з цілорічним повним навантаженням на електроенергію, з постійним споживанням холоду та тепла. Подальший розвиток в холодильній техніці буде пов'язаний з зміною класу робочих речовин та появою нових схемно-циклових рішень та устаткування.

Вирішення окремих питань з цих проблем пов'язане з дослідженням енергетичної складової використання компресорних холодильних машин та теплових насосів у складі системи тригенерації.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою дослідження є термодинамічний аналіз схемно-циклових рішень холодильної машини з приводом від сонячної фотоелектричної установки, який базується на визначенні енергетичної ефективності та габаритів циклів. Це дасть можливість забезпечити автономних споживачів цілорічним використанням кондиціонування та опалення на засадах енергозбереження та екологічної безпеки.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести термодинамічний аналіз циклів з середньотемпературними робочими речовинами;
- провести термодинамічний аналіз циклів з CO<sub>2</sub> робочою речовиною.

### **4. Термодинамічний аналіз циклів з середньотемпературними робочими речовинами**

Термодинамічний аналіз циклів холодильних машин та теплових насосів здійснюють при порівнянні дійсного з теоретичним для визначення необоротностей і пошуку шляхів їх мінімізації. Він є тією базою, яка підтримує вирішення більш складних завдань, наприклад, синтезу схемно-циклових рішень холодильних машин спеціального призначення. Таким є «метод циклів» [20].

Класична схема аналізу «методом циклів» представляє логічний ланцюг: цикл-зразок – еталонний цикл – дійсний цикл. Циклом-зразком, як правило, обирають оборотний цикл Карно. В залежності від складності задачі зразками можуть бути декілька циклів Карно, пов'язаних між собою вихідними параметрами майбутньої дійсної машини.

В роботі [6] було здійснено вказаним методом синтез циклу одноступеневої компресорної холодильної машини для тепло- холодопостачання приватного будинку. Машина являє елемент системи тригенерації з автономною фотоелектричною енергетичною станцією.

Рішення задачі здійснено за допомогою діаграми стану T-s. Кінцевий результат надано на рис. 1.

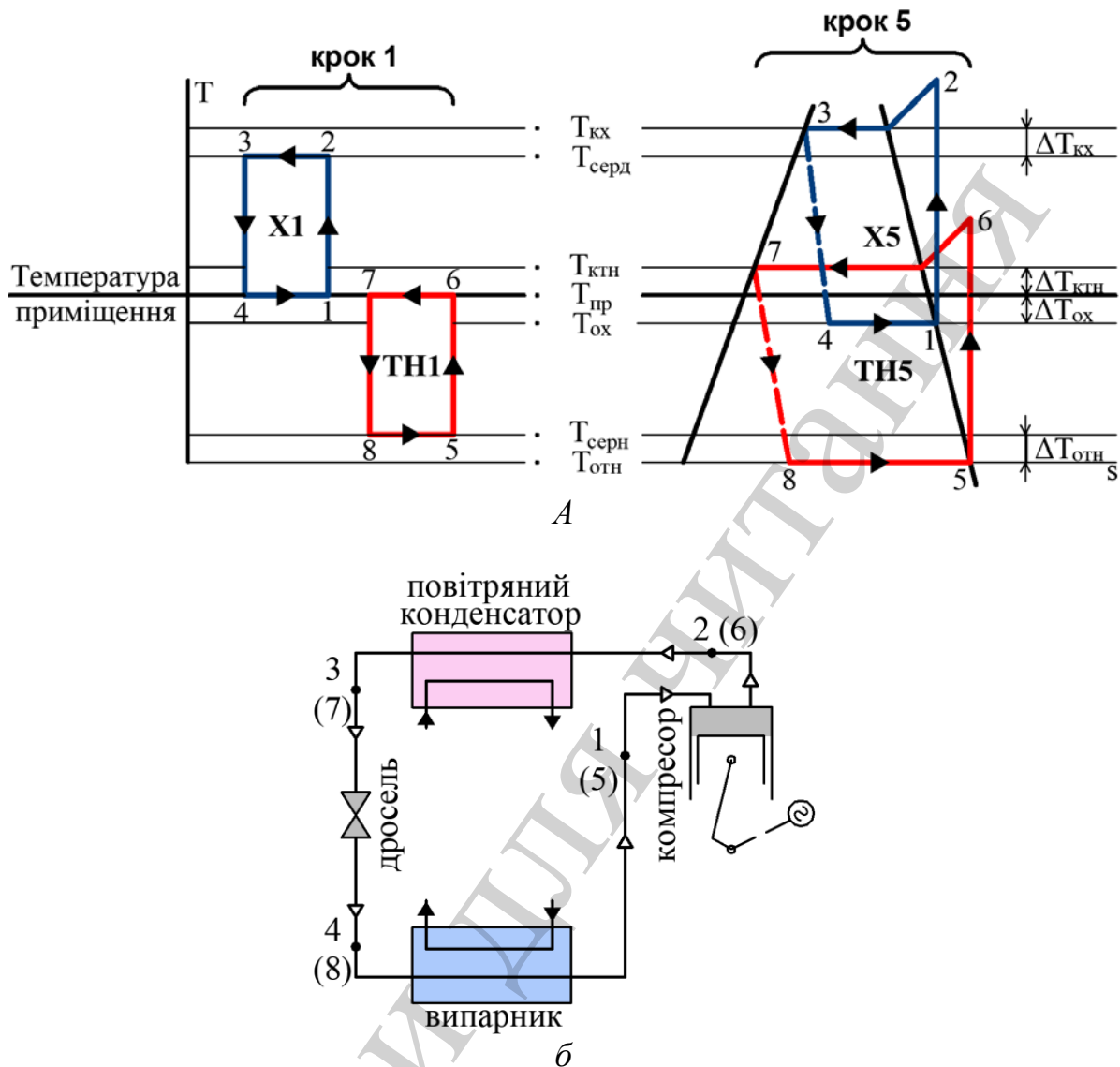


Рис. 1. Синтез схемно-циклового рішення одноступеневої компресорної холодильної машини для тепло-холодопостачання: а – цикл-зразок та еталонний в діаграмі T-s, б – принципова схема машини

Для виконання подальшого аналізу на рис. 1, а зображені лише цикли – зразки (крок 1 аналізу) та еталонний цикл машини (крок 5 аналізу). Еталонному циклу відповідає схема (рис. 1, б), яка включає компресор, конденсатор, випарник (повітроохолоджувач), дросель. На першому етапі аналізу конкретні робочі речовини не обговорювалися. Вихідними були умови: розглядаються середньотемпературні робочі речовини з високою критичною температурою, про що свідчить розташування кривих насичення в полі температурних режимів.

За наявності еталонного циклу, можна продовжити аналіз, вибрати робочі речовини і вирішити дві задачі:

– «енергетичну», оцінювання енергетичної ефективності машини (COP), пов'язаної з термодинамічними властивостями робочих речовин;

– «транспортну», оцінювання габариту циклу та асоційованими з ним масогабаритними характеристиками компресора.

Еталонний цикл складається з двох циклів Планка, холодильного 1234 та теплонасосного 5678, для робочих речовин R404A, R134a, R410, R290, R600a, R32. До складу увійшли ті, що не заборонені або термін їх використання ще не вийшов. Холодопродуктивність машини в режимі кондиціювання – 10 кВт, температурний режим: температура кипіння 15 °С, температура конденсації 50 °С. Теплопродуктивність в режимі опалення – 7 кВт, температурний режим: температура кипіння –5 °С, температура конденсації 30 °С. Для аналізу прийняті середні статистичні дані для житлових будинків площею до 150 м<sup>2</sup> в тропічному кліматі.

Основні характеристики циклів, отримані в теплових розрахунках двох режимів за методиками [20], наведено в табл. 1.

В графічному вигляді порівняльний аналіз за результатами рішення енергетичної задачі проілюстровано на рис. 2.

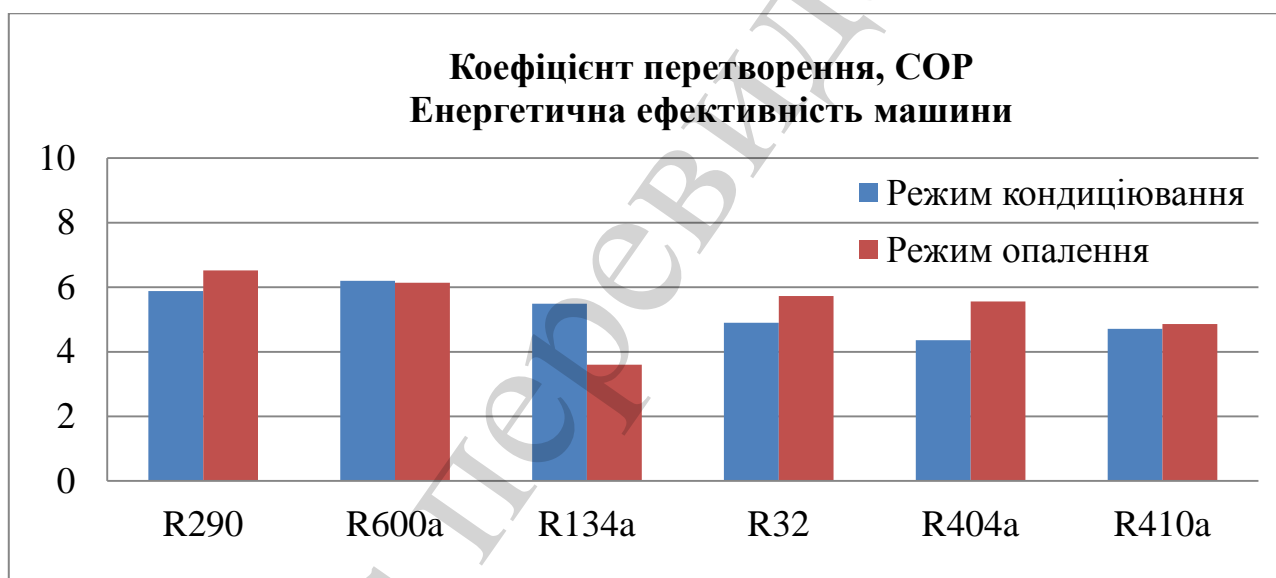


Рис. 2. Порівняльний аналіз термодинамічної ефективності циклів

Результати рішення енергетичної задачі свідчать, що R404A, R410, R32 в режимах кондиціювання та опалення мають однакову енергетичну ефективність, відрізняючись на більше ніж 10 %. Робочі речовини R290, R600a мають високу ефективність в обох режимах, R134a в режимі опалення конкуренто нездатний.

В графічному вигляді порівняльний аналіз за результатами рішення транспортної задачі проілюстровано на рис. 3.

Таблиця 1

Основні характеристики циклів для різних робочих речовин

Характеристика	Одиниці виміру	R290	R600a	R134a	R32	R404a	R410a
Режим кондиціонування							
Холодопродуктивність	кВт	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Питома масова холодопродуктивність	кДж/кг	256	255	135	219,5	93,47	137,8
Питоме навантаження на конденсатор	кДж/кг	295	292	155	255,6	110	161,5
Питома робота компресора	кДж/кг	39	37	20	36,1	16,99	23,7
Масова витрата холодоагенту	кг/с	0,039	0,039	0,074	0,046	0,107	0,072
Коефіцієнт подавання,	—	0,879	0,81	0,879	0,873	0,877	0,87
Теоретична об'ємна продуктивність компресора	м <sup>3</sup> /с, 10 <sup>3</sup>	2,8	7,0	3,5	1,4	2,5	7,3
Ефективна потужність компресора		1,7	1,61	1,82	2,04	2,29	2,12
Теплове навантаження на конденсатор	кВт	11,7	11,61	11,82	12,04	12,29	12,12
Коефіцієнт перетворення, COP	—	5,88	6,2	5,49	4,9	4,36	4,71
Коефіцієнт перетворення циклу-зразка		8,22	8,22	8,22	8,22	8,22	8,22
Ступінь термодинамічної досконалості еталонного циклу		0,793	0,747	0,438	0,697	0,676	0,591
Режим опалення							
Теплове навантаження на конденсатор	кВт	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Питома масова холодопродуктивність	кДж/кг	291	279	83	258,8	120	172,2
Питоме навантаження на конденсатор	кДж/кг	357	321	107	300,68	140,3	200,4
Питома робота компресора	кДж/кг	46	42	24	41,8	20,3	28,2
Масова витрата холодоагенту	кг/с	0,0196	0,022	0,065	0,023	0,05	0,035
Коефіцієнт подавання,	—	0,869	0,87	0,87	0,866	0,866	0,866
Теоретична об'ємна продуктивність компресора	м <sup>3</sup> /с, 10 <sup>3</sup>	2,7	6,9	6,1	1,4	2,6	1,4
Ефективна потужність компресора	кВт	1,072	1,14	1,94	1,22	1,47	1,44
Холодопродуктивність	кВт	5,928	5,86	5,06	5,78	5,53	5,56
Коефіцієнт перетворення, COP		6,52	6,14	3,6	5,73	5,56	4,86
Коефіцієнт перетворення циклу-зразка		8,657	8,657	8,657	8,657	8,657	8,657
Ступінь термодинамічної досконалості еталонного циклу		0,753	0,709	0,416	0,662	0,642	0,591



В «транспортній» задачі перевагу мають R32, R410 з мінімальними значеннями габаритів циклів (теоретичних об'ємних продуктивностей компресорів), слідом за ними йдуть R290, R404. Інші до альтернативної групи не входять. R134a потребує в робочих режимах різних габаритів циклів, це значить, що в режимі кондиціювання компресор буде навантаженим лише на 50 %.

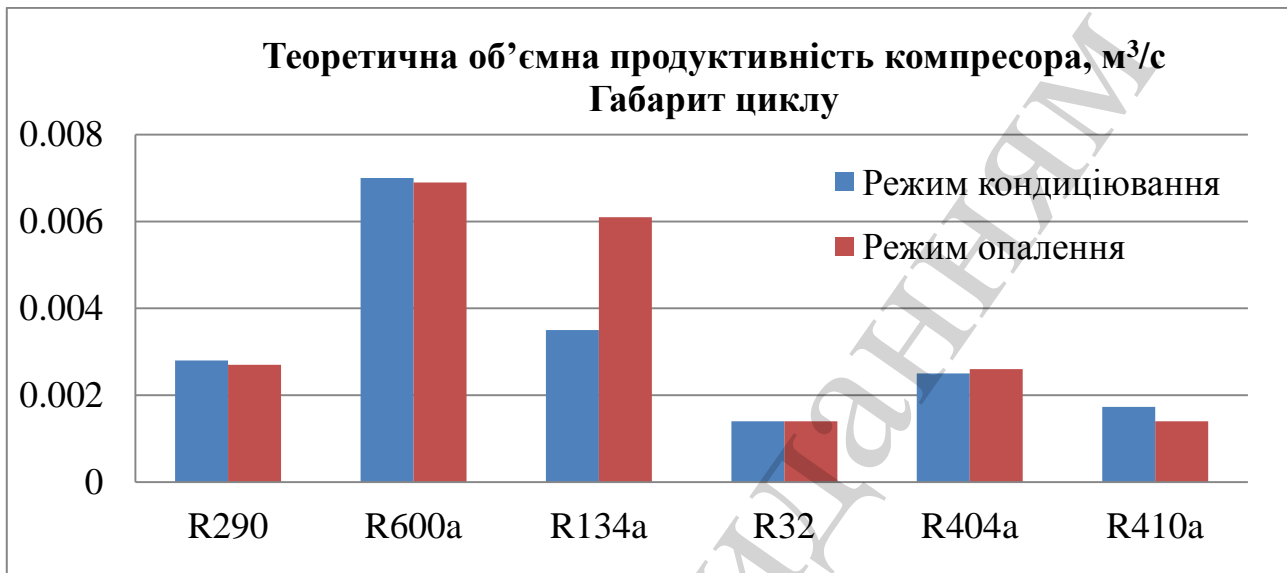


Рис. 3. Порівняльний аналіз масогабаритних характеристик машини

Виходячи з термодинамічного аналізу та моніторингу ринку робочих речовин, тільки R32 може бути рекомендованим з цієї групи речовин для реальних проектів. Підставою є нові серійні спіральні компресори фірми BITZER (Німеччина), зовнішній вигляд та температурні режими машини (точки А та В) представлені на рис. 4 [21].

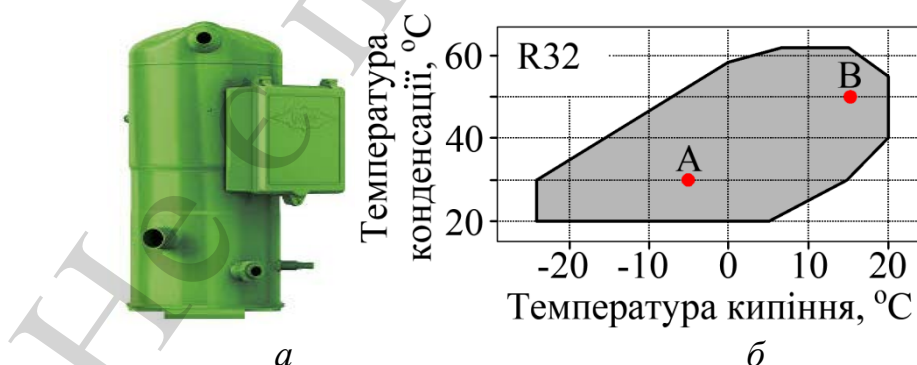


Рис. 4. Компресор спіральний серії ORBIT фірми BITZER (Німеччина) [21]: а – загальний вигляд, б – робочі режими А і В на R32

Нові моделі ORBIT фірми BITZER оснащені двигунами прямого пуску з постійними магнітами, що забезпечує високий рівень енергоефективності. Для

більшої гнучкості в регулюванні навантаження в систему можна включати частотний перетворювач.

В спіральних компресорах COPLANDSCROLL розвантаження при пуску та плавне регулювання холодопродуктивності в межах від 10 до 100 відсотків здійснюється за допомогою зміни часу ефективного стиснення. Розвантаження досягається за допомогою вертикального ходу нерухомої спіралі. При цьому електродвигун постійного струму працює постійно з низьким споживанням електроенергії. Компресор повністю відповідають вимогам приводу від сонячної фотоелектричної установки.

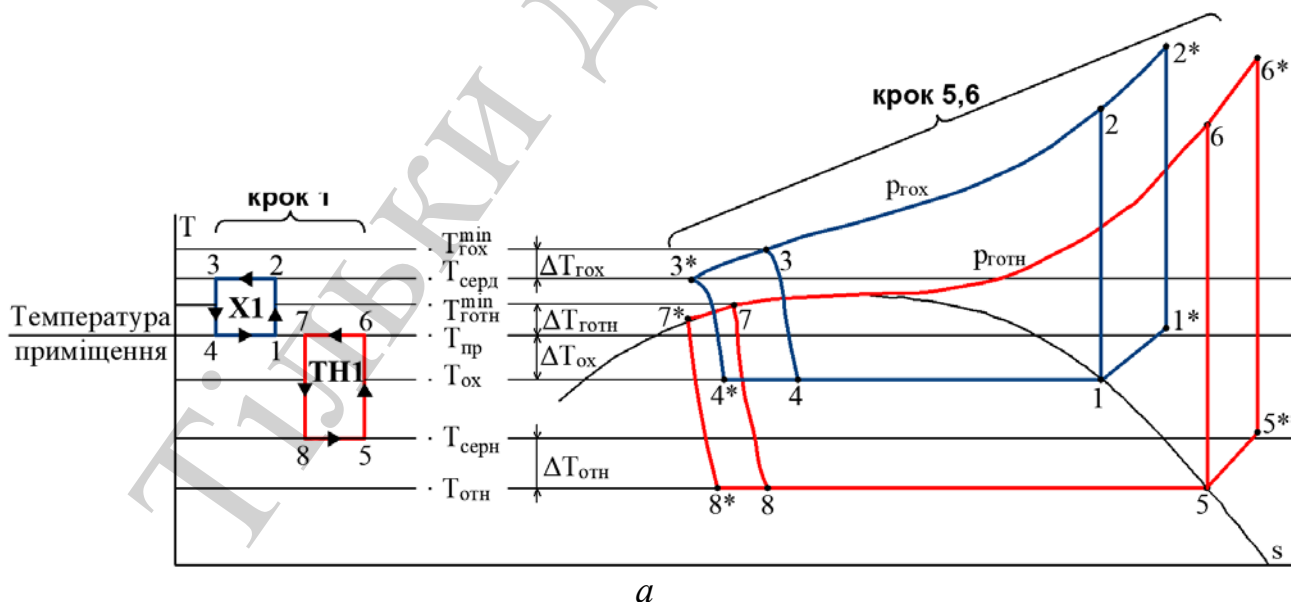
Термодинамічний аналіз свідчить, що для конкретного випадку вибір робочої речовини має великі обмеження.

## 5. Термодинамічний аналіз циклів з CO<sub>2</sub> робочою речовиною

Здійснимо синтез схемно-циклового рішення для машини з CO<sub>2</sub>, використовуючи «метод циклів» (рис. 5).

Циклом-зразком залишається об'єднання Карно-Карно (крок 1 аналізу). При низькій критичній температурі CO<sub>2</sub> криві насичення з критичною точкою виявляються в зоні робочих температур дійсного циклу. Тоді процеси відведення тепла повинні здійснюватися в транскритичній області (крок 5 та крок 6)

В схемі традиційний конденсатор замінено на газовий охолоджувач. Еталонні цикли, холодильний 1234 та теплонасосний 5678, побудовано за умови: стан робочої речовини на всмоктуванні компресора – суха насичена пара, температура перед дроселем дорівнює температурі конденсації попередніх робочих речовин. Схему машини до еталонних циклів надано на рис. 5, б. Розрахункові характеристики еталонних циклів з CO<sub>2</sub> наведено в табл. 2.



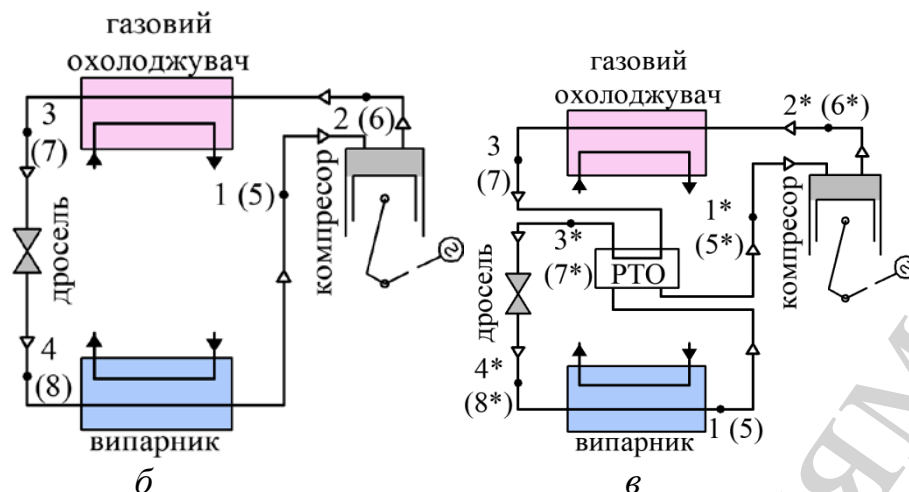


Рис. 5. Синтез схемно-циклового рішення компресорної холодильної машини з CO<sub>2</sub> для тепло-холодопостачання: *а* – цикли в діаграмі *T-s*, *б* – схема до еталонного циклу, *в* – схема до дійсного циклу

Таблиця 2

Основні характеристики циклів для CO<sub>2</sub>

Характеристика	Одиниці виміру	Режим кондиціювання		Режим опалення	
		Цикл еталонний	Цикл дійсний	Цикл еталонний	Цикл дійсний
Холодопродуктивність,	кВт	10,0	10,0	5,2	5,4
Питома масова холодопродуктивність	кДж/кг	103.26	128.3	140.49	154.3(
Питоме навантаження на газовий охолоджувач	кДж/кг	127.82	151	177.21	197
Питома робота компресора	кДж/кг	24.56	27	36.72	42.72
Масова витрата робочої речовини	кг/с	0.0968	0,0779	0.039	0,0335
Коефіцієнт подавання	—	0.88	0,80,	0.866	0,76
Теоретична об'ємна продуктивність компресора	м <sup>3</sup> /с, 10 <sup>3</sup>	0,68	0,72	0,542	0,62
Ефективна потужність компресора	кВт	2.95	2,87	1.8	2,15
Теплове навантаження на газовий охолоджувач, (теплопродуктивність)	кВт	12.37	11,76	7,0	7,0
Коефіцієнт перетворення, COP	—	3.38	3,48	3,88	3,25

Результати розрахунків показують низьку енергетичну ефективність еталонних циклів з  $\text{CO}_2$  порівняно з попередніми робочими речовинами.

Традиційно підвищити енергетичну ефективність циклів можна, використовуючи внутрішню регенерацію тепла. Нове схемне рішення ілюструє рис. 5, в, нове циклове рішення ( $1^*2^*3^*4^*$  та  $5^*6^*7^*8^*$ ) зображено поруч з еталонним (крок б) на рис. 5, б.

Результатом внутрішньої регенерації тепла є зниження енергетичної ефективності (табл. 2), і це не суперечить минулим дослідженням [20]. В транспортній задачі габарити циклів машини з  $\text{CO}_2$  в 3...4 рази менші таких показників з попередньої групи робочих речовин, і це значні переваги.

Для практичної реалізації машини можна рекомендувати компресори фірми BITZER (Німеччина) [22] – зовнішній вигляд та температурні режими машини (точки А та В) одного з них представлені на рис. 6.

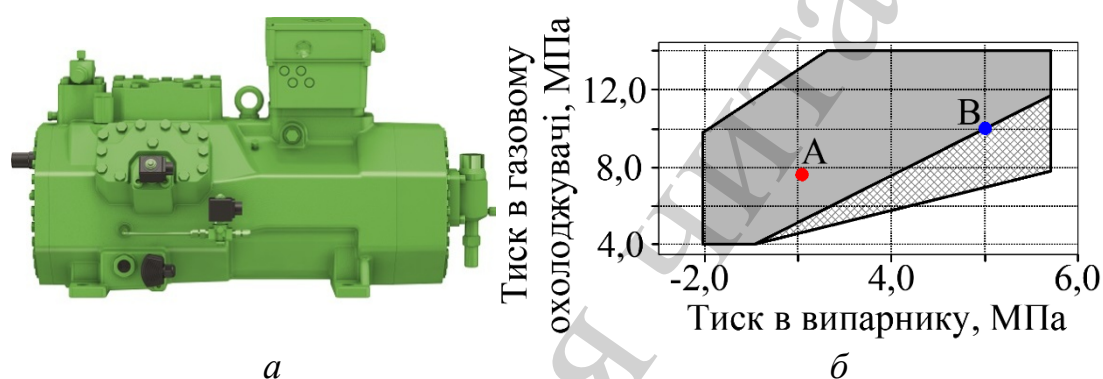


Рис. 6. Компресор поршневий напівгерметичний серії ECOLINE+ фірми BITZER (Німеччина) [22]: а – загальний вигляд, б — робочі режими А і В на  $\text{CO}_2$

У серії компресорів ECOLINE + для досягнення найвищої енергоефективності розроблена нова технологія електродвигуна прямого пуску з постійними магнітами та можливістю роботи з частотними перетворювачами. Компресори оснащені новою системою механічного регулювання холодопродуктивності від 10 до 100 відсотків. Спільно з механічним регулюванням продуктивності, яке також є новим для транскритичних циклів з  $\text{CO}_2$ , істотно підвищується ККД системи при повному та частковому навантаженні. Компресор повністю відповідає вимогам приводу від сонячних фотоелектричних установок.

Якщо на ринку з'являться холодильні компресори малої продуктивності для R290, він має переваги перед всіма альтернативними.

## 6. Обговорення результатів термодинамічного аналізу схемно-циклового рішення машини тепло- холодопостачання індивідуального будинку

Проведені теоретичні дослідження схемно-циклових рішень одноступеневої компресорної машини тепло-холодопостачання. Передбачено декілька обов'язкових умов:

- наявність групи робочих речовин, які відповідають сучасним вимогам експлуатації холодильних машин і створюють альтернативу один одному;
- наявність серійного устаткування та його характеристик за даними фірм-виробників.

В процесі дослідження було вирішено дві задачі: «енергетичну» з визначенням енергетичної ефективності циклів та «транспортну» з визначенням габаритів циклів (теоретичної об'ємної продуктивності компресора), що асоційовано з його масогабаритними характеристиками. Розглянуто два температурних режими: кондиціювання та опалення з постійними холодо- та теплопродуктивностями для R134a, R404A, R410, R290, R600a, R32 робочих речовин.

Рішення енергетичної задачі встановило, що цикли з усіма робочими речовинами в машині для тепло- холодопостачання мають рівну та однаково високу енергетичну ефективність ( $COP=4,0\dots6,0$  в режимі кондиціювання,  $COP=5,0\dots6,5$  в режимі опалення). Це пов'язано, по-перше, з тим, що інтервал робочих температур циклів ( $T_k - T_o$ ) малий і не перевищує 35 град, по-друге, енергетична ефективність циклів холодильних машин та теплових насосів (зворотних термодинамічних циклів) залежить тільки від різниці температур, а властивості речовин (внутрішні необоротності циклів) на неї впливати не будуть [20].

Для холодильних машин габарити компресора визначаються величиною питомого об'єму робочої речовини на всмоктуванні в компресор. Зрозуміло, що однією з основних властивостей холодоагентів є об'ємна холодопродуктивність, що змінюється в досить широкому діапазоні для різних робочих речовин. Отже, для досягнення мінімальних габаритів циліндра компресора при заданій холодопродуктивності необхідний пошук робочої речовини з великим значенням питомої об'ємної холодопродуктивності.

Розглядаючи сукупність циклів, обмежених верхньою і нижньою температурами, можна виділити такий з них, який має найменший габарит циклу. В «транспортній» задачі перевагу мають R32, R410.

Аналіз схемно-циклового рішення з  $CO_2$  здійснено окремо з огляду на транскритичні цикли в машині, а взагалі  $CO_2$  не розглядається як альтернатива, а як майбутнє холодильної техніки.

Отримані теоретичні результати свідчать про потенціальні можливості використання розглянутих робочих речовин в машині для тепло- холодопостачання приватного споживача з високою енергетичною ефективністю та задовільними масогабаритними характеристиками. Екологічні вимоги та наявність одноступеневих компресорів на ринку устаткування для розглянутих температурних режимів є підставою рекомендувати тільки  $CO_2$  та R32 для реальних проектів. Якщо на ринку з'являться холодильні компресори малої продуктивності для R290, він має переваги перед всіма іншими.

Представлені результати можна враховувати початком в дослідженні одноступеневих компресорних холодильних машин в системах тригенерації з автономними сонячними фотоелектричними установками. Розвиток спрямувати на пошук нових об'єктів тепло-холодопостачання з розширенням інтервалів робочих температур та пошуком нових робочих речовин для їх практичної реалізації.

## 7. Висновки

1. Термодинамічний аналіз встановив, що цикли з R134a R404A, R410, R290, R600a, R32 робочими речовинами в машині для тепло- холодопостачання мають високу енергетичною ефективністю ( $COP=4,0\ldots6,0$  в режимі кондиціювання,  $COP=5,0\ldots6,5$  в режимі опалення). Термодинамічний аналіз рекомендував виключити R134a R600a з розгляду транспортної задачі як неконкурентно здатних за габаритами циклів, які в 3...4 рази більші за інші.

2. Термодинамічний аналіз встановив, що цикли з  $CO_2$  мають термодинамічну ефективність на 50 % нижче, ніж попередні робочі речовини. Габарити циклів в 3...4 рази менші, і такі показники разом з екологічною безпекою роблять машини з  $CO_2$  перспективними для забезпечення енергетичних, соціально-екологічних потреб населення регіонів з складними кліматичними умовами.

## Литература

1. Развитие мировой холодильной промышленности.  
URL: <http://znakka4estva.ru/dokumenty/ekonomika/razvitie-mirovoy-holodilnoy-promyshlennosti/>
2. Performance assessment of cogeneration and trigeneration systems for small scale applications / Angrisani G., Akisawa A., Marrasso E., Roselli C., Sasso M. // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 125. P. 194–208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.092>
3. Денисова А. Є., Альхемірі Саад А., Морозюк Л. І. Обговорення можливості створення систем тригенерації в умовах клімату країн Близького Сходу // Холодильна техніка і технологія. 2018. Т. 54, № 5. С. 36–43. doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v54i5.1249>
4. Split/Multi-Split Type Air Conditioners. URL: [https://www.daikin.com/products/ac/lineup/split\\_multi\\_split/](https://www.daikin.com/products/ac/lineup/split_multi_split/)
5. York Rooftop Units Heating and Air Conditioning. URL: <https://www.master.ca/en/professionnal/rooftop-units>
6. Схемно-конструктивні та технологічні особливості систем тригенерації для умов Близького Сходу / Денисова А. Є., Морозюк Л. І., Алхемірі Саад А., Цуркан А. В. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2018. № 40. С. 10–16. doi: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2018.40.02>
7. Ключев П. Г. Солнечная энергетика: 2014. URL: [http://www.nanometer.ru/2010/08/23/12825909129704\\_216802.html](http://www.nanometer.ru/2010/08/23/12825909129704_216802.html)
8. Bellos E., Tzivanidis C. Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 161. P. 493–509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.159>
9. Ghafoor A., Munir A. Worldwide overview of solar thermal cooling technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 43. P. 763–774. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.073>

10. Medved D. Trigeneration units // Intensive Programme “Renewable Energy Sources”. 2011. P. 47–50.
11. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_215](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_215)
12. Coulomb D. The refrigerants future: the phase down of HFCs and its consequences // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы VI МНТК. Санкт-Петербург. СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2013. С. 3–6.
13. Запрет хладагента R134a в Европе. 2017. URL: <http://www.automaster.net.ua/artykuly/zapret-hladagenta-r134a-v-evrope,49721?wyslij=49721>
14. Regulation (EU) No. 517/2014. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>
15. California approves original SNAP rules // Cooling Post. 2018. URL: <https://www.coolingpost.com/world-news/california-approves-original-snap-rules/>
16. Environmentally friendly and efficient propane heat pump. 2018. URL: <https://phys.org/news/2018-09-environmentally-friendly-efficient-propane-burning.html>
17. Comparative techno-economic assessment of a converted DC refrigerator and a conventional AC refrigerator both powered by solar PV / Opoku R., Anane S., Edwin I. A., Adaramola M. S., Seidu R. // International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 72. P. 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.08.014>
18. Infante Ferreira C., Kim D.-S. Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data // International Journal of Refrigeration. 2014. Vol. 39. P. 23–37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.033>
19. Experimental investigation of solar photovoltaic operated ice thermal storage air-conditioning system / Xu Y., Li M., Luo X., Ma X., Wang Y., Li G., Hassanien R. H. E. // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 86. P. 258–272. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.035>
20. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант», 2006. 712 с.
21. Scroll Compressors // BITZER. URL: <https://www.bitzer.de/gb/en/scroll-compressors/?country=gb>
22. Поршневые компрессоры // BITZER. URL: <https://www.bitzer.de/ru/ru/поршневые-компрессоры/>